

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**MODELACIÓN MATEMÁTICA Y FÍSICA
DE UN VERTEDERO MODIFICADO**

Sergio Liscia, Mauricio Angulo, Mariano de Dios, Mercedes Del Blanco.

Laboratorio de Hidromecánica – Área Departamental Hidráulica – Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata. Argentina

soliscia@ing.unlp.edu.ar; mauricio.angulo@ing.unlp.edu.ar; dediosmariano@gmail.com; mercedes.delblanco@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

Los aliviaderos son quizá unas de las obras hidráulicas más ensayadas a lo largo de la historia de los modelos a escala. En cambio, la modelación matemática tridimensional de estas obras no cuenta con muchos antecedentes debido a que el desarrollo del software y de computadoras con gran potencia para el cálculo intensivo es muy reciente. El siguiente artículo presenta simultáneamente la modelación física y matemática de la modificación de un vertedero con el objetivo de validar la aplicación de modelos CFD en este y otro tipo de obras hidráulicas. Los resultados obtenidos permiten comparar los niveles de la superficie libre y campo de velocidades en secciones transversales para ambas modelaciones. La validación de la modelación matemática permitió estudiar numerosas modificaciones a la obra y su optimización sin necesidad de repetir en modelo físico cada modificación. Esto ahorró tiempo y recursos materiales y humanos. Dicha experiencia permitirá a los ingenieros hidráulicos ganar confianza en el uso de la modelación CFD.

ABSTRACT

Spillways are probably one of the most tested hydraulic structures in the history of physical modelling. On the other hand, there are not many 3D mathematical models of this type of structures since only very recently have CFD software and new computers (with a high capability and power to make intensive calculations) become available. The present paper shows simultaneous physical and mathematical modeling of a modified spillway, aiming at validating the use and application of CFD models on this and other kinds of hydraulic structures. Results obtained enable a comparison between water surface levels and velocity fields in both kinds of model. The validation of the mathematical model allowed the study of a large number of alternatives and their optimization without need to test them on the physical model. This was relevant to save time, material and human resources. This experience is expected to allow Hydraulic Engineers to gain confidence in using CFD models.

PALABRAS CLAVES

Vertedero, Modelo físico, Modelo CFD

INTRODUCCIÓN

Este artículo presenta la modelación matemática y física de una obra de alivio existente, sobre la cual se estudia su modificación y readaptación para hacer lugar a la instalación de una central hidroeléctrica sobre algunos vanos de la misma.

Este trabajo se apoya en dos pilares: Los ensayos sobre modelo físico realizados en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNLP y La modelación matemática del flujo mediante el software CFD: FLOW-3D®.

En este trabajo se presenta el caso particular de un proyecto de ampliación de una central hidroeléctrica, sobre el vertedero secundario del aprovechamiento que descarga en un brazo del río.

El proyecto plantea la construcción de una central sobre el vertedero del brazo secundario para aprovechar la generación de energía con el caudal erogado al mismo, cuya finalidad actual es sostener las condiciones adecuadas de integridad ambiental. El vertedero existente posee 16 vanos con compuertas sector y una capacidad de evacuación de 40.000 m³/s, 2500 m³/s por vano. Cada vano tiene un ancho de 15 m y el vertedero un ancho total de 304 m. Aguas abajo el cuenco disipador se extiende 86 m desde el pie del perfil vertedor.

La central proyectada tendrá una potencia instalada de aproximadamente 280 MW, y estará equipada con 5 grupos bulbo con rodete Kaplan. Cada turbina bulbo toma el ancho de un vano de vertedero y la cota de instalación de las mismas requiere demoler el cuenco disipador del vertedero para profundizar debajo del mismo en un ancho total de 5 vanos.

Con el objetivo que el vertedero no vea reducida su capacidad de erogación, la evacuación de crecidas es efectuada por sobre la estructura de la central bulbo. Para esta operación la central cuenta con 2 compuertas: la de aguas arriba es tipo “flap” y la compuerta de aguas abajo tipo “basculante”. Ambas conforman junto con la losa superior de las galerías electromecánicas de la central un nuevo nivel de descarga (ver **Figura 1**). Además cada vano queda delimitado por la prolongación de las pilas del vertedero, en sus laterales, logrando así un conjunto único turbina-evacuador de crecidas en cada uno de los 5 vanos a intervenir.

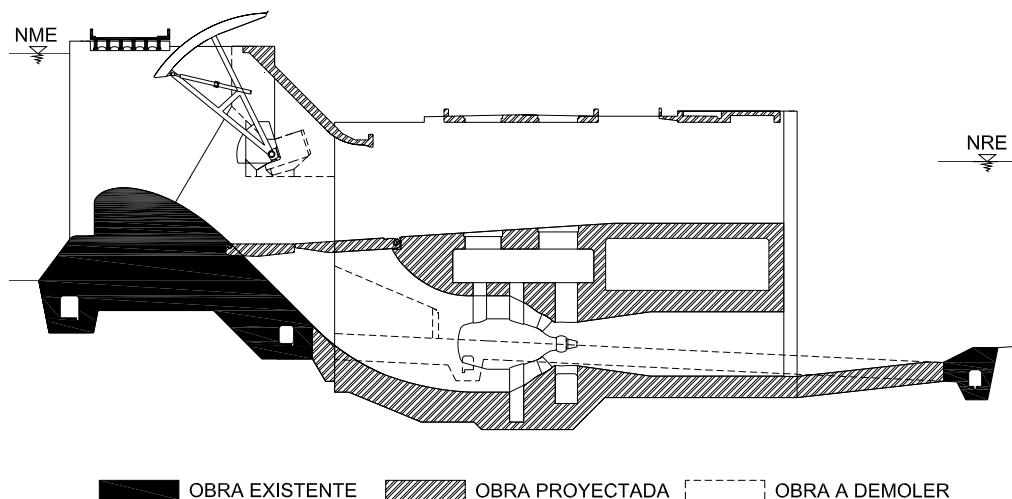


Figura 1.- Obra existente y obra proyectada

MODELACIÓN FÍSICA

Características del modelo y del Laboratorio de ensayos

El modelo físico se modeló con semejanza de Froude y se construyó con una escala de longitudes de 1:50. Las restantes escalas resultan:

- Escala de Caudales: 1:17.678
- Escala de Velocidades: 1:7,07
- Escala de Presiones: 1:50

La geometría modelada está conformada por el vano central con medio vano a cada lado del mismo, para considerar el efecto tridimensional del escurrimiento en la aducción. Las dimensiones en planta del modelo son 2,4 m x 0,760 m (ver **Figura 2**). También se representó la compuerta sector del vano central debido a que, para la condición ensayada, los brazos de la misma quedan parcialmente dentro del flujo.

El perfil vertedor, las pilas del vertedero, la compuerta sector y los tabiques que continúan las pilas del vertedero se construyeron completamente en acrílico, con una estructura metálica que la sujeta al fondo del canal de ensayos y le brinda rigidez a la estructura.

El modelo se montó en la nave principal de ensayos del Laboratorio de Hidráulica de la UNLP, siendo alimentado por el circuito de tanque de nivel constante. Este tanque posee varias salidas equipadas con toberas y válvulas esclusas que permiten aforar el caudal total. El agua es entregada a un canal vidriado de sección rectangular (2 x 1 x 25 m) dentro del cual se fijó la estructura del vertedero ensayado. Aguas abajo del vano central se construyó un canal rectangular que conduce el agua hacia un vertedero de pared delgada con el ancho de la cresta contraído. Este permite aforar el caudal que se eroga sobre el vano central en estudio. Finalmente, la totalidad del caudal vierte a una cisterna subterránea desde donde es bombeada al tanque elevado para cerrar el circuito de ensayo.

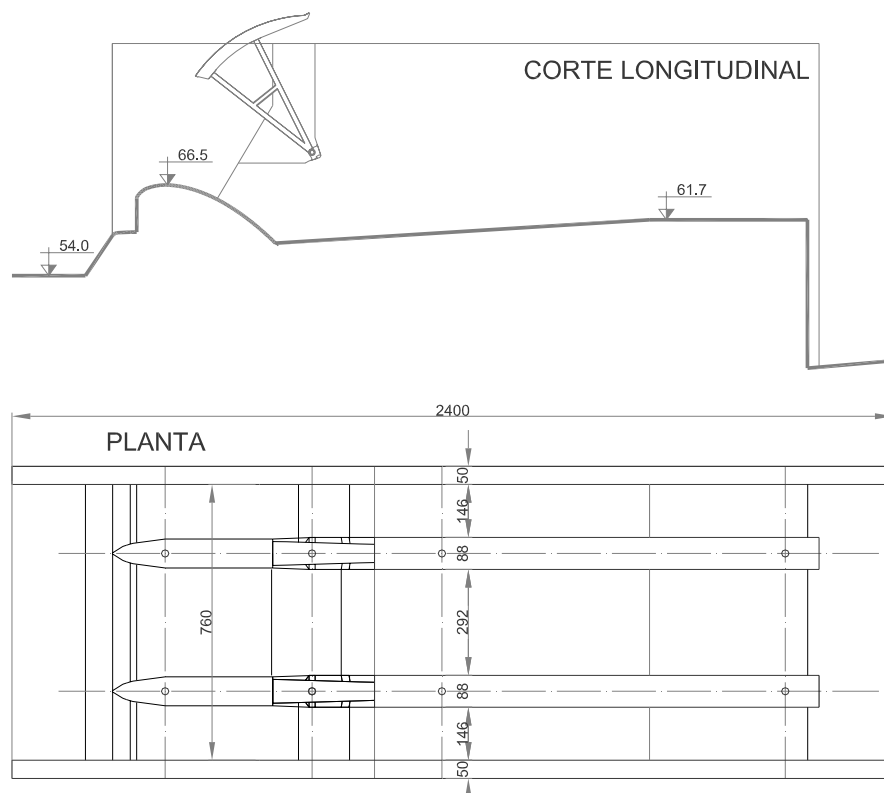


Figura 2.- Modelo físico a escala (Esquema simplificado)

La restitución al río está en parte formada por la rápida existente y continúa con el lecho de roca de basalto. En el extremo del canal se instalaron compuertas de fondo que permiten la regulación del nivel de restitución permitiendo imponer la condición de frontera adecuada. Estas estructuras están construidas en chapa en los laterales y fondo.

Características de los ensayos

Los ensayos realizados corresponden con la condición de pasaje de la crecida máxima probable (CMP). El caudal por vano para esta condición es de 2500 m³/s en prototipo y 142 l/s en modelo. Se realizaron 2 ensayos los cuales se diferencian principalmente en el diseño de la transición entre la pila existente del vertedero y los muros laterales que conformarán la central hidroeléctrica. En esta transición se localiza el muñón que soporta el empuje de la compuerta sector.

Las condiciones de borde para los ensayos son: Caudal de ingreso al vano central de 142 l/s (CMP) y Nivel de restitución 70.2 mIGM. El caudal que circula sobre el vano central se aforó con un vertedero de pared delgada, como se mencionara antes y el caudal total entrante al modelo físico mediante una batería de toberas. El nivel de la restitución se controló con compuertas de fondo y se verificó que el nivel del embalse coincida con 84,5 mIGM que corresponde con el nivel máximo extraordinario del embalse. Ambos niveles se midieron con limnígrafos.

En cada alternativa se relevó un perfil longitudinal de la superficie libre en el centro y en los laterales cercanos a los muros con un limnígrafo montado sobre una plataforma metálica sobre el canal de ensayos, el cual puede desplazarse a lo largo del eje del vano central, en el ancho del vano y en profundidad con precisión milimétrica.

El relevamiento del campo de velocidades se realizó con un velocímetro acústico Doppler (ADV Nortek Vectrino) a una frecuencia de 10 Hz de muestreo. El rango de medición de este instrumento se encuentra entre 0,01 y 4 m/s con un error de medición del 1% del rango seteado de medición para 25 Hz. La frecuencia máxima de muestreo puede llegar a 200 Hz.

MODELACIÓN MATEMÁTICA

Breve descripción del modelo FLOW-3D®

La modelación matemática se realizó mediante el uso de licencias del software **FLOW-3D®**, adquiridas por el Laboratorio de Hidromecánica de la Facultad de Ingeniería – UNLP. La empresa que lo desarrolla es Flow Science Inc. ubicada en Santa Fe, Estados Unidos.

El software resuelve numéricamente por diferencias finitas las ecuaciones de Navier-Stokes y de continuidad. Estas son ecuaciones diferenciales de segundo orden, no lineales y dependientes del tiempo, donde la solución numérica de las mismas implica aproximar los términos que la componen con expresiones algebraicas.

El programa consta también de varios módulos complementarios para la resolución de distintos problemas tales como el transporte de sedimentos, cuerpos sólidos en movimiento, escurrimiento en medios porosos, etc.

Para los problemas de flujos considerados incompresibles la ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\mu A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(w A_z) + \xi \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad [1]$$

Cuando se está trabajando con el sistema de coordenadas cartesianas R es igual a la unidad y ξ es igual a cero. R_{SOR} contempla las fuentes de masa y A son las fracciones de áreas abiertas al flujo en las direcciones "x", "y" y "z".

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido son:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \quad [2]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y v u}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \quad [3]$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \quad [4]$$

En estas ecuaciones G es la aceleración de la masa según la dirección que indica en subíndice, f la aceleración viscosa, b es la pérdida en medios porosos y los últimos términos corresponden a fuentes de masa representadas por componentes geométricos.

Para la representación de la turbulencia hay cinco modelos disponibles: el modelo de longitud de mezcla de Prandtl, los modelos $k-\epsilon$ de una y dos ecuaciones, un modelo basado en los métodos RNG (Renormalization-Group) y un modelo de simulación de grandes vórtices (large eddy simulation, LES).

El espacio que se pretende modelar es discretizado mediante una malla estructurada de celdas prismáticas donde se aplican las ecuaciones mencionadas y se las resuelve numéricamente mediante dos métodos posibles: la sobre-relajación sucesiva (successive over-relaxation) y la alternación de la dirección especial (special alternating direction).

La particularidad que caracteriza a este modelo CFD es su capacidad de modelar la superficie libre del fluido a lo largo del tiempo. El modelo permite que una celda esté parcialmente ocupada por el fluido. El espacio adyacente de la celda es ocupado por un gas del cual se desprecia su inercia y es así reemplazado por un espacio vacío representado por una presión y temperatura uniforme. Esto reduce en gran parte el esfuerzo de cálculo que implicaría modelar la dinámica del gas, el cual en la gran mayoría de los casos no tiene influencia en la dinámica de un fluido mucho más pesado, como el agua. Esto es resuelto por el método VOF (Volumen Of Fluid).

Otra característica importante del software es la aplicación del método FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation), mediante el cual formula todas las ecuaciones con una función de área y volumen de porosidad. Esta función permite modelar con gran detalle geometrías complejas.

El programa no tiene un límite superior especificado en cuanto a la cantidad de celdas que puede tener una simulación, sin embargo, una malla más fina resulta en un mayor dominio de cálculo, afectando directamente el tiempo de computadora empleado en cada simulación. Por lo tanto el grado de refinamiento de la malla computacional resulta de una solución de compromiso entre el grado de precisión deseado en cada simulación y el tiempo de cálculo requerido por la simulación. Este balance es particularmente importante en una etapa de diseño ya que requiere un proceso de aproximaciones sucesiva a la solución óptima, por el contrario puede no resultar determinante en etapa de verificación de una única condición particular de operación.

También existe la posibilidad de anidar mallas, esto es: definir una malla dentro de otra con una mayor densidad de celdas. De esta forma puede evaluarse en una misma corrida problemas de distintas escalas.

En cuanto a las diferentes condiciones de borde que pueden darse sobre las seis caras de la malla ortogonal se encuentran: presiones, caudales, velocidades y niveles de agua, variables o no en el tiempo, entre otras.

Implementación del modelo CFD

A continuación se describen las etapas más relevantes del proceso de modelado:

Construcción de la geometría: El proceso de diseño hidráulico requiere una interacción constante con el diseño estructural, por ello es necesario utilizar una herramienta de uso común a ambas disciplinas que permitan una rápida y eficiente comunicación. El uso de herramientas CAD se ha extendido ampliamente en el diseño de las obras civiles, y es mediante esta herramienta que se realizó el modelado en tres dimensiones de la geometría. El formato de intercambio utilizado es la estereolitografía cuya extensión es: “.stl”. Se dividió la geometría en varios bloques, procurando que aquellos bloques susceptibles de ser modificados durante el diseño, puedan ser reemplazados completamente para simplificar este proceso.

Mallado: Para modelar la geometría del vertedero modificado se optó por mallas ortogonales. Se modeló en 3 etapas para reducir el tiempo de cálculo:

1º etapa: Puesta en régimen con mallas gruesas.

2º etapa: Refinamiento de la malla con cálculo en 1º orden de la advección cantidad de movimiento.

3º etapa: Aumento de la precisión de cálculo a 3º orden de la advección cantidad de movimiento.

Se dividió el dominio como se muestra en la Figura 3. Se utilizaron 3 mallas ortogonales de celdas cúbicas:

El orden de advección indica el grado de aproximación de los términos convectivos de la variación de la velocidad.

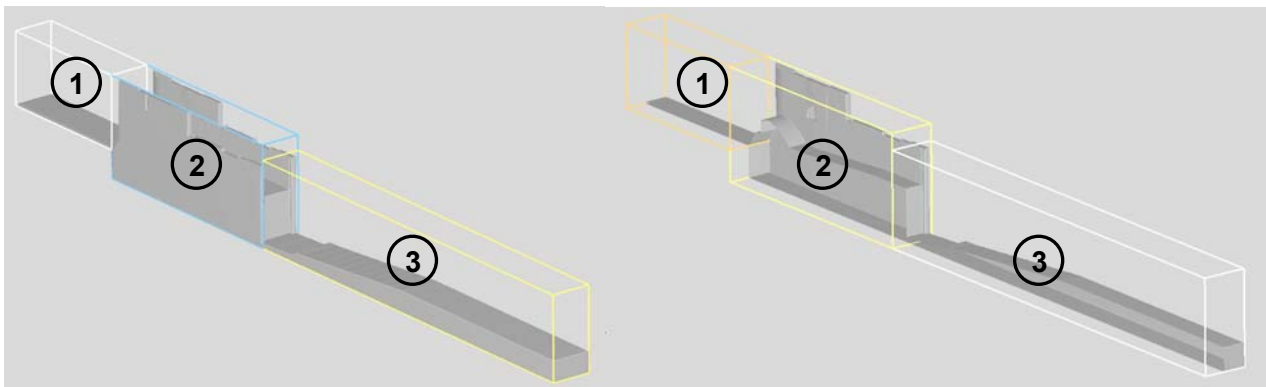


Figura 3.- Mallado de la geometría

Malla	Etapa 1		Etapa 2		Etapa 3	
	Lado (m)	Nº Celdas	Lado (m)	Nº Celdas	Lado (m)	Nº Celdas
1	1.00	42.636	0.50	314.088	0.50	314.088
2	0.50	742.976	0.25	5.943.808	0.25	5.943.808
3	1.00	152.000	0.50	1.216.000	0.50	1.216.000
Nº de Celdas del dominio	Total	1.046.976	Total	7.930.368	Total	7.930.368
	Activas	598.164	Activas	4.470.932	Activas	4.470.932
Longitud de la simulación (seg)	600		40		97	
Tiempo de cálculo de computadora (hs)	19,6		53,5		92,4	

Tabla 1: Características de las etapas de simulación

En todos los casos la rugosidad absoluta elegida para todos los componentes es de 1 mm. Dicho valor proviene de haber modelado el vertedero original (sin modificaciones) en CFD con una malla uniforme con celdas de 0,5 m de lado, hasta obtener un caudal por vano igual al que indica la curva de descarga para vertedero libre, obtenida en el modelo físico.

Condiciones de Borde: Sobre la malla 1 (aguas arriba) se impuso el nivel de la superficie libre de embalse para la crecida máxima probable, equivalente a 84,5 mIGM. Sobre la malla 3 (aguas abajo) se fijó el nivel de la restitución correspondiente de 70,2 mIGM. Ambas condiciones corresponden con la Crecida máxima probable. Resumiendo, en las caras de aguas arriba y aguas abajo la condición de borde es altura de fluido constante (Specified pressure/fluid height) y para el resto de las caras la condición de simetría (symmetry). Si bien es posible imponer un caudal aguas arriba, la condición de borde utilizada siempre ha resultado en corridas más estables.

Modelo de Turbulencia: El modelo de turbulencia utilizado es el k- ϵ /RNG, adoptándose un valor constante de longitud de mezcla máxima de 0,84 m. Dicho valor corresponde con los valores recomendados por la bibliografía, es decir un $0,07 \times L_{ref}$, donde la longitud de referencia es el tirante sobre la cresta del vertedero equivalente a 12 m. La modelación con una longitud de mezcla variable en el tiempo (dynamically computed) no dio buenos resultados, provocando corridas inestables y no convergentes.

Condiciones Iniciales: Cada etapa requirió diferente extensión de la simulación en función de la densidad de la malla adoptada y de la necesidad de estabilización del flujo en el tiempo. La 1° etapa parte de una condición de flujo donde se llena todo el dominio con fluido con velocidad nula hasta la cota máxima del embalse. Se han ensayado otras condiciones de inicio de la corrida y en general la condición aplicada logra estabilizarse más rápidamente que llenando el dominio con diferentes bloques de fluido, en particular si se tienen aguas abajo y aguas arriba condiciones de nivel constante, es decir que resulta una mejor condición de inicio un proceso de “vaciado” y no de “llenado” del dominio. La condición inicial de la 2° etapa es el resultado del último intervalo de tiempo de la 1° etapa. La 3° etapa también toma la condición última de la 2° etapa. Este encadenamiento (restart) de simulaciones es muy importante para contar con resultados de alta resolución espacial y temporal en un tiempo de simulación adecuado.

Simulación: El objeto de las simulaciones es el análisis del pasaje de la CMP, por lo tanto interesa como resultado estudiar el estado permanente del flujo. Como consecuencia es necesario descartar el tiempo de simulación del fenómeno impermanente, que resulta de partir de una condición inicial estática, para así poder alcanzar una condición de régimen permanente del escurrimiento. La longitud requerida por esta simulación y el tiempo de cálculo requerido por la computadora se resume en la Tabla 1. Como referencia del tiempo de cálculo insumido se indican las principales características de la computadora utilizada en la modelación: Windows XP 64-bits, Procesador Intel® Core i7 (4 procesadores de 2.67 GHz) y 8 GB de memoria RAM.

Como criterio para detener la simulación se sigue durante la corrida la evolución de la energía cinética media del flujo, hasta que las variaciones a lo largo del tiempo comienzan a disminuir. Alcanzada la estabilización de este parámetro se verifica que dicha estabilización también se refleje en el caudal que atraviesa el dominio, tomando como referencia la malla más fina. En general se ha observado en esta serie de modelaciones y en la de otras obras hidráulicas, que en aquellas donde existe la presencia de resalto hidráulico, la estabilización de la energía cinética media del flujo no es completa, sino que se registra una oscilación de aproximadamente igual magnitud y período que se sostiene a lo largo del tiempo.

Resultados del modelo CFD

A modo ilustrativo se presenta a continuación el resultado de la modelación numérica de las dos alternativas, en donde se observa el campo de velocidades para toda la masa de fluido escurriendo para el caudal de la CMP. Estos resultados corresponden a la 3° etapa de modelación, de mayor resolución espacial y 3° orden. Como se observa, el nivel de detalle alcanzado permite observar claramente las diferencias entre el diseño de las alternativas planteadas.

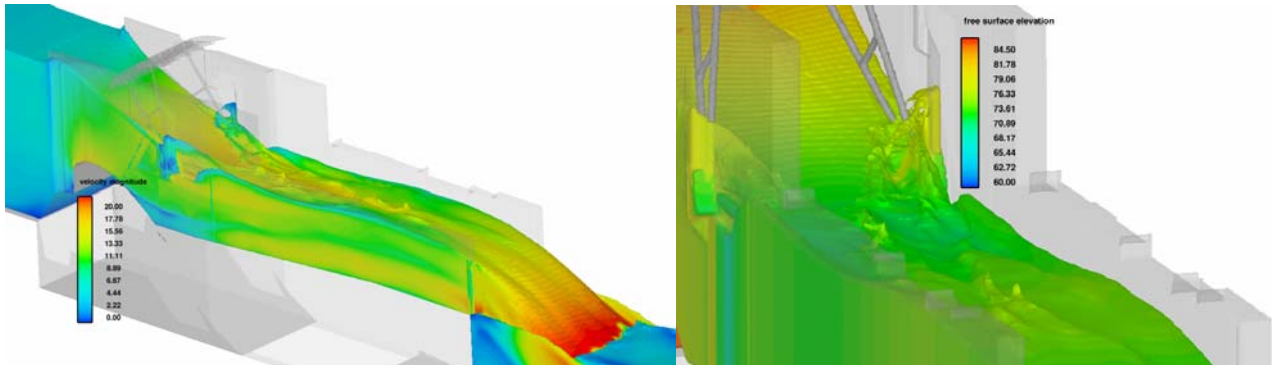


Figura 4.- Salida simulación de la alternativa 1

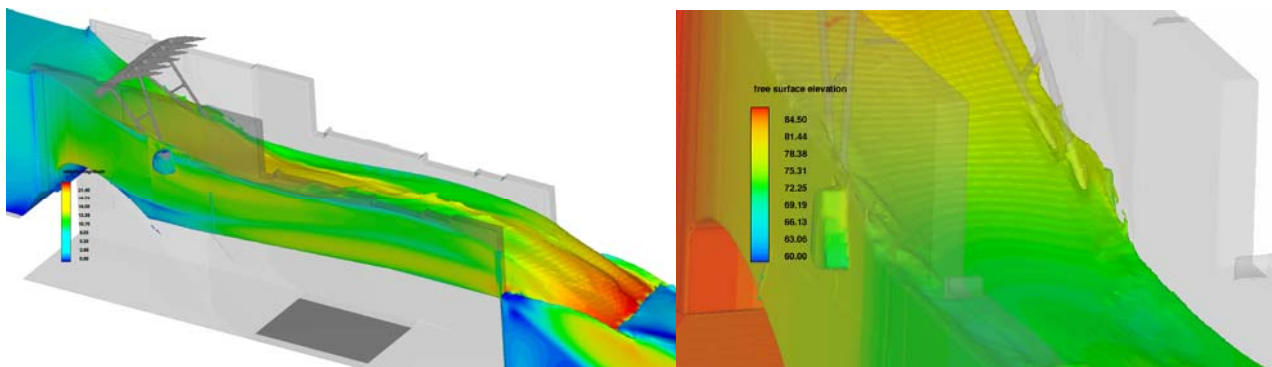


Figura 5.- Salida simulación de la alternativa 2

ESTUDIOS COMPARATIVOS Y VALIDACIÓN

Las geometrías modeladas corresponden a diferentes alternativas propuestas para resolver la transición que une la pila del vertedero existente y los muros laterales de la futura central. Sobre esta transición se ubica el actual muñón que soporta los brazos de la compuerta sector, que por cuestiones estructurales no se intervendrá, generando una transición con cierta complejidad geométrica (Ver Figura 6).

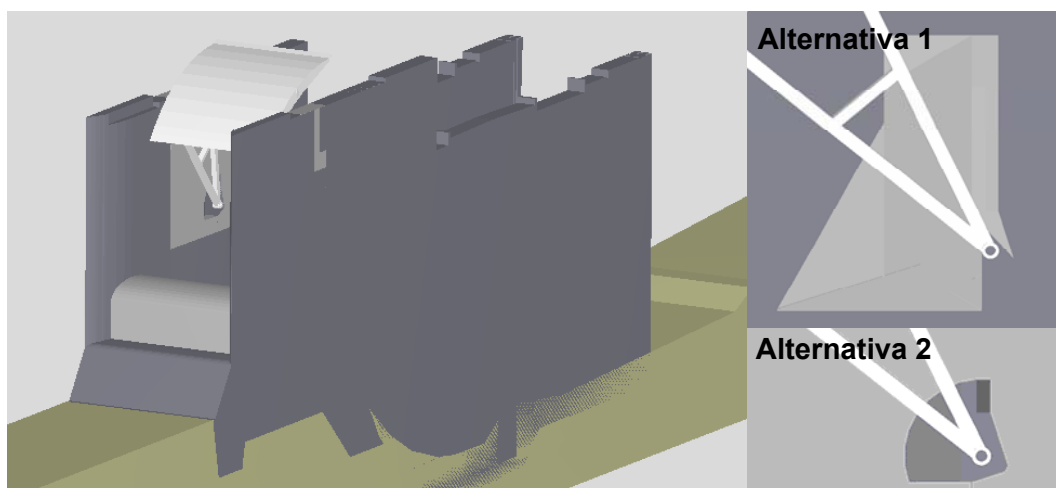


Figura 6.- Vista tridimensional de la geometría modelada y detalle del muñón

Para la validación de los resultados obtenidos en modelo matemático se evaluaron comparativamente tres aspectos:

- Relevamiento de perfiles longitudinales de la superficie libre.
- Relevamiento del campo de velocidad en secciones transversales.
- Comparación cualitativa del patrón de flujo de escurrimiento.

Relevamiento de la superficie libre:

Se realizaron relevamientos, durante la modelación física, para las dos geometrías que se denominan alternativa 1 y 2. Cada uno de estos fue comparado con los resultados de las simulaciones numéricas correspondientes.

En los Gráficos 1 y 2 se puede observar la comparación del perfil relevado de la superficie libre tanto en el eje del vano como en los laterales cercanos a los muros, para la alternativa 1. Los perfiles son comparados con resultados de una simulación con aproximación de 1° orden en el Gráfico 1 y de 3° orden en el Gráfico 2. El Gráfico 3 corresponde con la alternativa 2 y la comparación se realizó con corridas de aproximación de 3° orden.

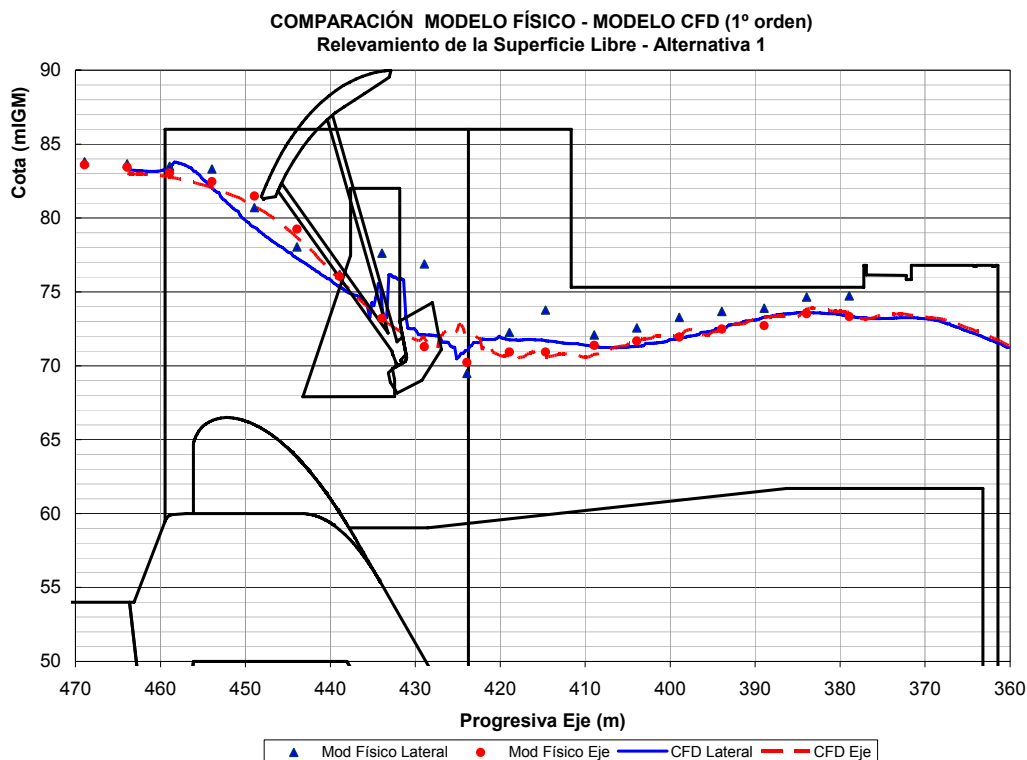


Gráfico 1.- Comparación MF/MM¹ - Alternativa 1 (1° orden)

Para el relevamiento en modelo físico de aquellos puntos de la superficie libre que fluctúan a lo largo tiempo, se midió la altura máxima alcanzada en el punto. Este criterio tiene como objetivo detectar la cota de pelo de agua más desfavorable que pueda alcanzar las estructuras que se encuentran en la parte superior del canal. Debido este criterio de medición y a que el flujo choca con los brazos de la compuerta y/o con el hueco en la transición sobreelevándose y fluctuando ampliamente en el tiempo, se observan en los perfiles laterales los mayores apartamientos respecto de la modelación numérica.

¹ Modelo Físico vs. Modelo Matemático

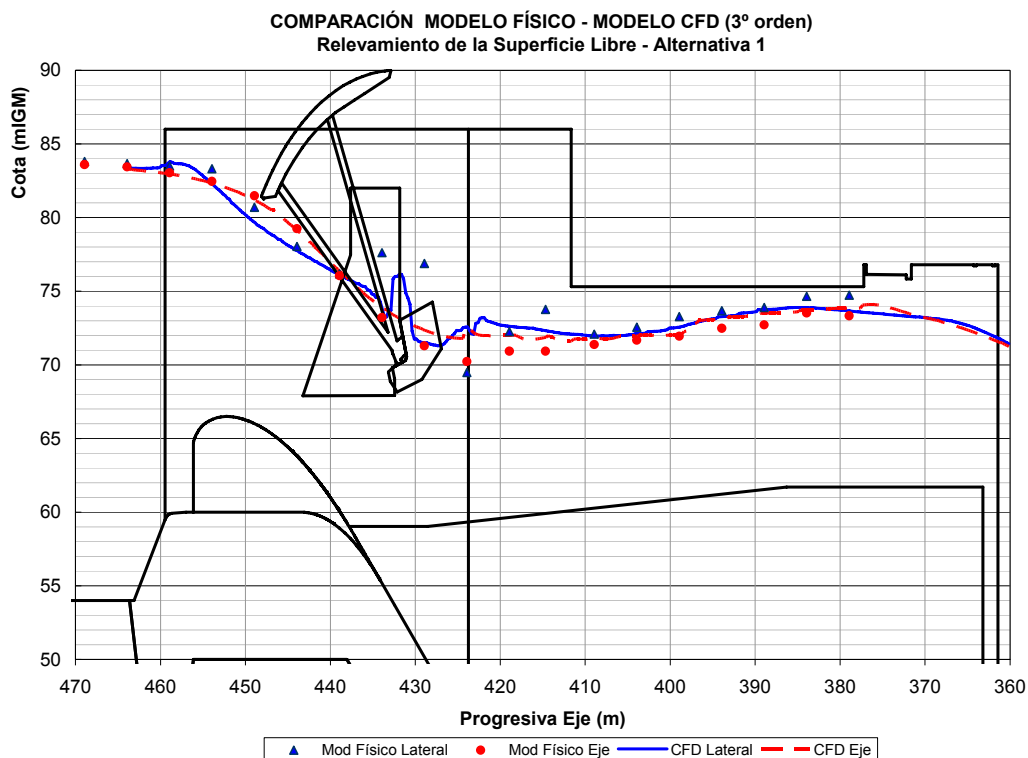


Gráfico 2.- Comparación MF/MM - Alternativa 1 (3° orden)

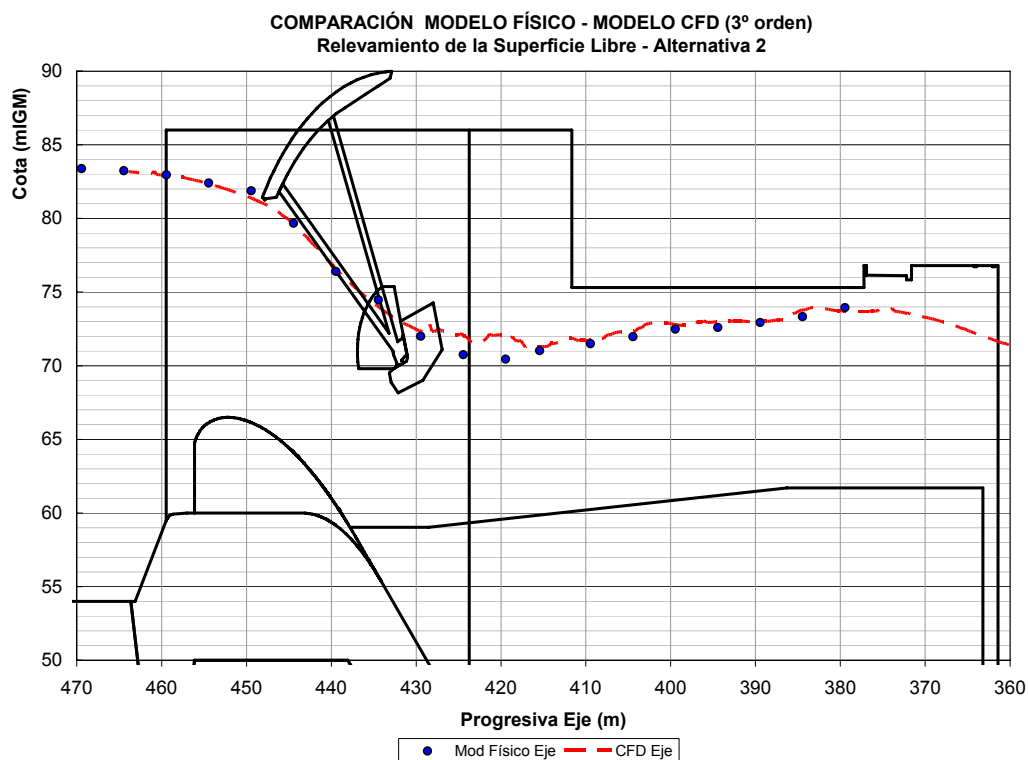


Gráfico 3.- Comparación MF/MM - Alternativa 2 (3° orden)

En todos los casos los resultados de modelación matemática con aproximación de 3° orden resultan más próximos a las mediciones en modelo físico, aunque teniendo en consideración el esfuerzo de cálculo requerido según se indicó en la Tabla 1. Una aproximación de 1° orden resulta en una mejor relación precisión/tiempo de computadora requerida en un proceso de diseño en donde es necesario correr muchas simulaciones para obtener la geometría hidráulica óptima. En cambio una aproximación de 3° orden resulta más adecuada para la simulación de la geometría hidráulica final

Relevamiento del campo de velocidad:

Para la alternativa 2, se relevaron en modelo físico en diferentes secciones transversales, perfiles del campo de velocidad para contrastarlas con las obtenidas en CFD.

Las secciones escogidas para la comparación se muestran en la Figura 7. Corresponden aquellas donde las mediciones en modelo físico son consistentes, es decir, los valores registrados con el ADV presentan una correlación mayor al 80 % en la mayoría de los puntos medidos.

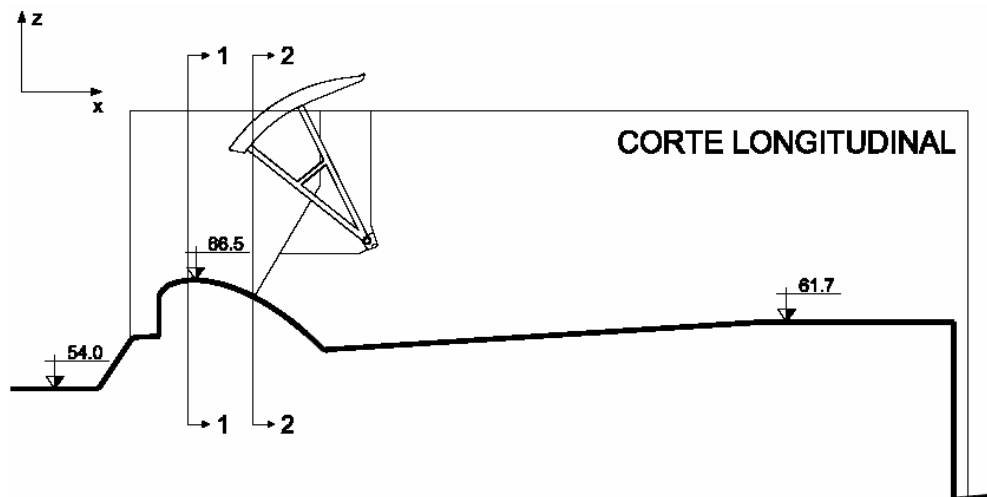


Figura 7.- Ubicación de secciones para comparación de perfiles de campo de velocidad

El criterio para efectuar la comparación del campo de velocidades es utilizar los mismos puntos de la grilla de medición del modelo físico para determinar el perfil de velocidades en el CFD. Por este motivo es que solo aparece un sector del campo de velocidades (el ADV puede medir velocidades por debajo de los 5 a 7 cm de la superficie libre).

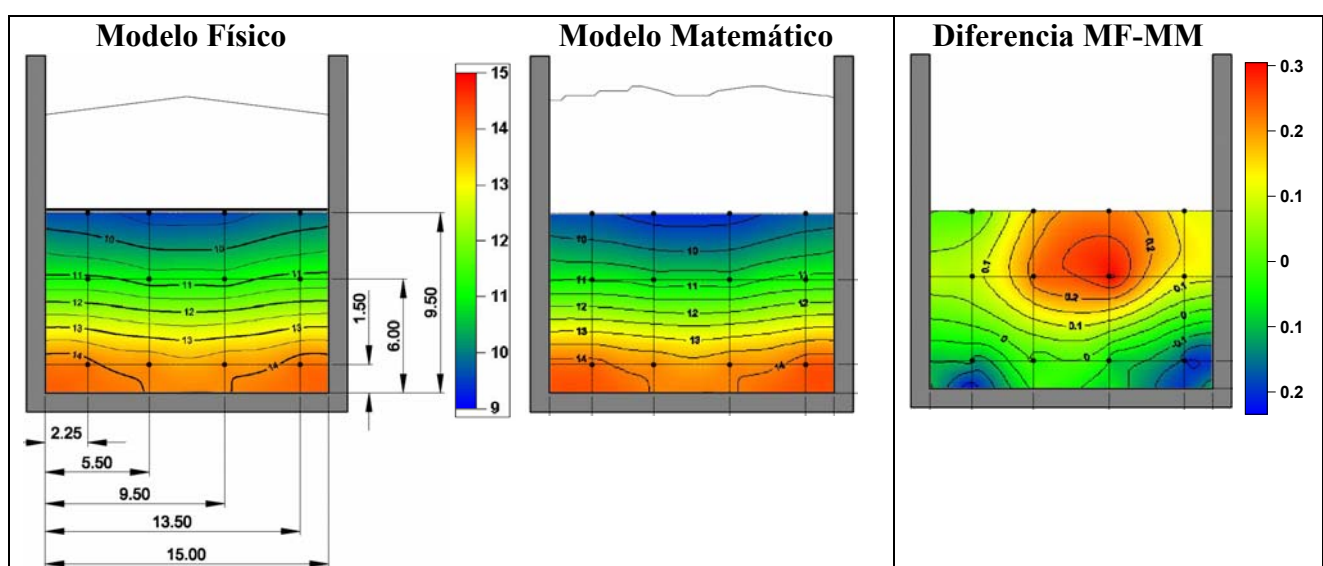


Figura 8.- Comparación del perfil de velocidades en "x" MF/MM – Sección 1

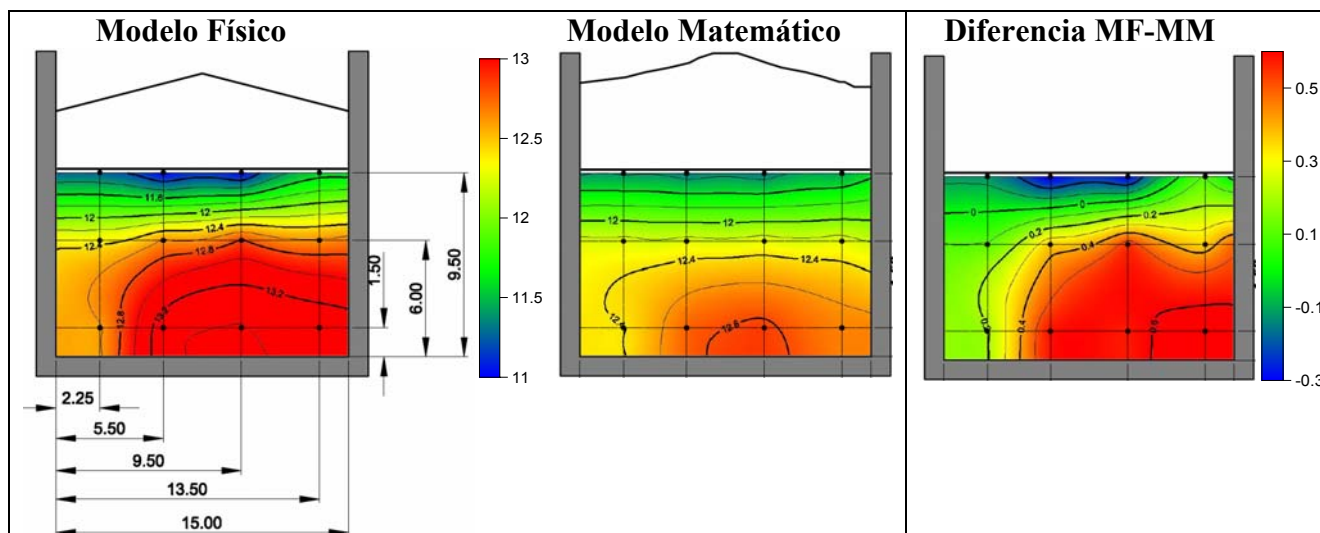


Figura 9.- Comparación del perfil de velocidades en “x” MF/MM – Sección 2

La distribución de velocidades en el eje “x” obtenida a partir del modelo matemático presenta un muy buen ajuste con los medidos en el modelo físico, una diferencia menor al 6 %.

Comparación cualitativa del patrón de escurrimiento:

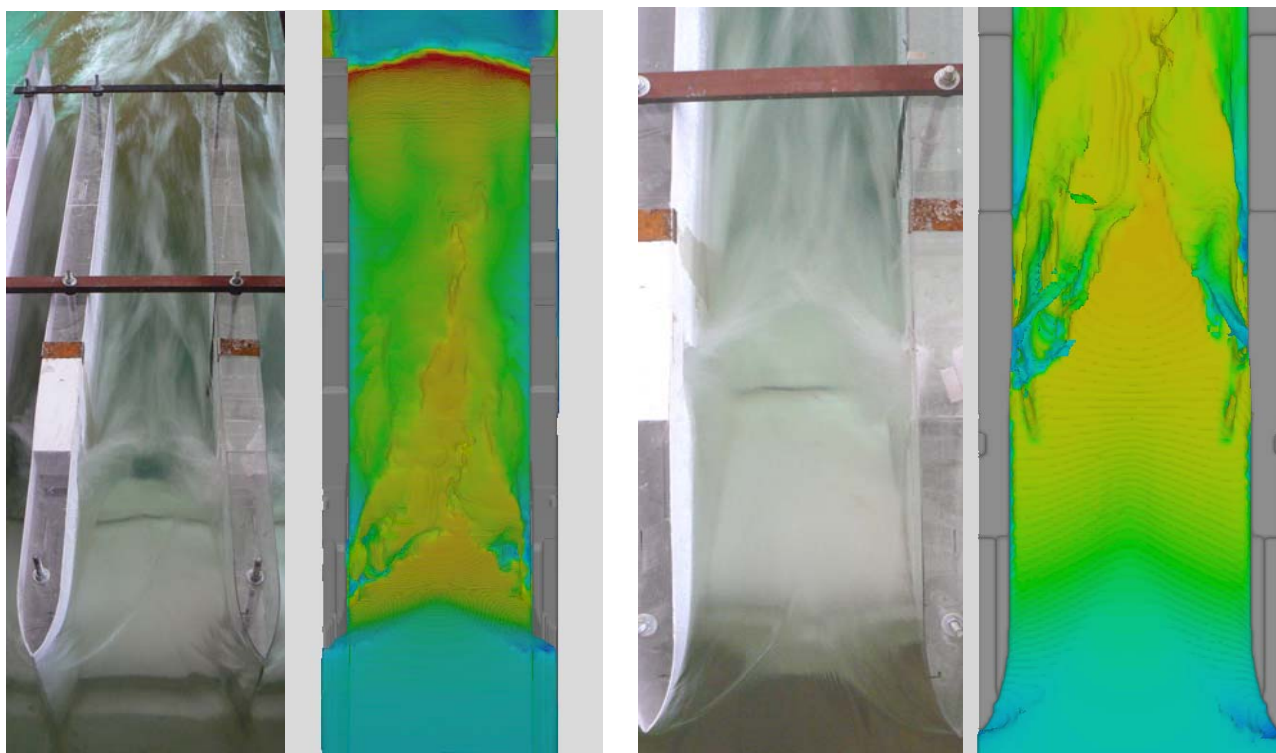


Figura 10.- Comparaciones Modelo físico – Modelo Matemático (Alternativa 1)

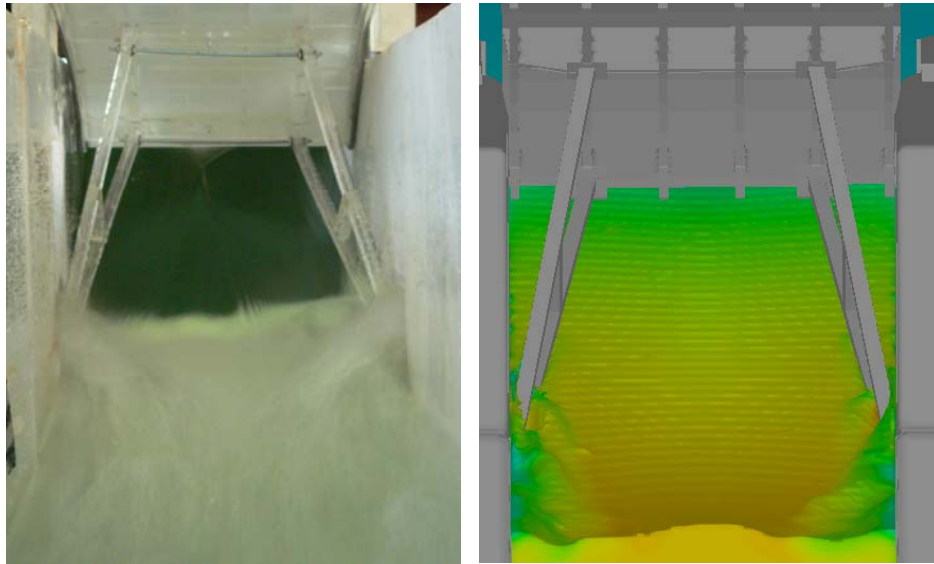


Figura 11.- Comparaciones Modelo físico – Modelo Matemático (Alternativa 2)

Si se tienen en cuenta las imágenes tomadas en los ensayos en modelo físico, y se las compara con vistas tridimensionales extraídas de la modelación numérica, puede observarse una clara concordancia en los patrones de escurrimiento. El modelo CFD reproduce una superficie libre no solo con tirantes similares sino también el choque con obstáculos.

CONCLUSIONES

La modelación conjunta de una misma geometría con un modelo físico y un modelo matemático resultaron muy satisfactorias no sólo desde el punto de vista cualitativo, que proviene de la simple observación del comportamiento del flujo, sino también desde el punto de vista cuantitativo, ya que pudo verificarse una muy buena correlación en los perfiles de la superficie libre relevados y en los campos de velocidades de diferentes secciones.

Igualmente es importante destacar la similitud no sólo en el comportamiento general del escurrimiento sino también en singularidades tales como el choque del flujo con los brazos de la compuerta.

Una característica importante de la modelación CFD es que puede contarse con información para todo el dominio de cálculo. También permiten observar y analizar diferentes variables del flujo como la velocidad, la presión, la disipación turbulenta y la vorticidad entre otras. La observación y cuantificación de ciertos fenómenos puede resultar muy difícil en los modelos físicos. Ello no significa que los modelos CFD puedan sustituirlos en cualquier tipo de obra hidráulica, sino por el contrario, pueden complementarse aprovechando la potencialidad que cada uno posee.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

D. Ho, K. Boyes, S. Donohoo, B. Cooper. “Numerical Flow analysis for spillways”. *43th ANCOLD Conference, Tasmania*, Oct 2003.

D. Ho, B. Cooper, K. Riddette, S. Donohoo. “Aplication to numerical modeling to spillways in Australia. *Dams and Reservoirs, Societies and Environment in de 21th century*, Taylor and Francis Group, Londres, 2006.

P. Chanel, J. Doering. “Assessment of spillway modeling using computational fluid dynamics”. *Canadian Journal of Civil Engineering*, NRC, Vol. 35, Dec 2008, pp. 1481-1485.

E. Teklemariam, B. Shumilac, D. Murray, G. K. Holder. “Combining Computational and physical modeling to design the Keeyask Station”. *Hydro Review*, HCI Publications, Canada, Jul 2008.

F. Laugier, G. Guyot, E. Valette, B. Blancher, A. Oguic, L. Lincker. “Engineering use of hydrodynamic 3D simulation to assess spillway discharge capacity”. *Coloque CFBR-SHF: “Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de creus”*, Paris, 2009.